

УДК 621.386

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ КОНЦЕПТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ РЕНТГЕНОВСКОГО ИСТОЧНИКА С АВТОЭМИССИОННЫМ КАТОДОМ

© 2017 г. Н. А. Дюжев¹, М. А. Махиборода¹, Р. Ю. Преображенский¹*,
Г. Д. Демин¹, Е. Э. Гусев¹, А. А. Дедкова¹

¹Национальный исследовательский университет “МИЭТ”, НТЦ НМСТ,
124498 Москва, Зеленоград, Россия

*E-mail: cogtepsum@gmail.com

Поступила в редакцию 09.03.2016 г.

Предложена концептуальная модель источника рентгеновского излучения на основе автоэмиссионного катода и прострельной мишени, совмещенной с кремниевым рентгеновским окном. Методами численного моделирования показано, что предложенная конструкция способна генерировать ток эмиссии существенной величины. Можно получить малое фокусное пятно на мишени и, соответственно, высокую разрешающую способность. Определены параметры мишеней, обеспечивающие наибольшую интенсивность рентгеновского излучения. Показано, что эффективная генерация излучения достигается в пленке вольфрама толщиной 0.25 мкм и пленке молибдена толщиной 0.13 мкм соответственно. Продемонстрирована прозрачность кремниевой мембраны толщиной 1–2 мкм для рентгеновского излучения в диапазоне длин волн до 1.6 нм, а также достаточная механическая прочность мембраны к перепаду давлений порядка 2 атм., что указывает на возможность ее использования в качестве рентгеновского окна.

Ключевые слова: рентгеновский источник, полевой нанокатод, автоэлектронная эмиссия, ток эмиссии, микроэлектромеханические системы, рентгеновское излучение, компьютерное моделирование.

DOI: 10.7868/S0207352817040060

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в различных областях науки и техники остро ощущается необходимость в миниатюрных рентгеновских источниках с низким энергопотреблением, возможностью сканирования рентгеновским лучом и вариации частоты излучения, а также малым временем подготовки к работе.

Подобные источники рентгеновского излучения востребованы для целого спектра практических применений, таких как медицинская техника, оборудование для рентгенофлуоресцентного анализа, системы безопасности и противодействия терроризму. При росте чувствительности рентгеновских сенсоров потребителям необходимы рентгеновские трубки малой и сверхмалой мощности (единицы Ватт), а также “низковольтные” (с напряжением порядка 10 кВ), поскольку такой рентгеновский источник, особенно работающий в импульсном режиме, практически безвреден для человека.

Источники рентгеновского излучения могут найти применение как в передовом аналитическом оборудовании, так и в технологии создания наноструктур и новых материалов. С помощью рентгеновского излучения можно изучать струк-

туру объектов и получать трехмерные изображения. Такое излучение практически не взаимодействует с объектами и во многих случаях не требует специального препарирования.

В практических приложениях очень привлекательно и перспективно использование в рентгеновских источниках автоэмиссионного катода в качестве альтернативы традиционному накаливаемому эмиттеру. Основные преимущества холодного источника электронов обусловлены фундаментальными отличиями процесса автоэлектронной эмиссии от термоэлектронной. Автоэлектронная эмиссия представляет собой чисто квантовый эффект. На высвобождение электронов из эмиттера не требуются затраты энергии на сам эмиссионный акт в отличие от термоэмиссии, требующей нагрева катода. Кроме того, использование полевого эмиттера позволяет избавиться от загрязнения поверхности мишени продуктами эрозии термо катода, которое значительно снижает чистоту вакуума и приводит к падению эмиссионных характеристик рентгеновского источника в рабочей области мягкого рентгеновского излучения. Плотность автоэмиссионного тока экспоненциально зависит от напряженности прикла-

дываемого электрического поля и может в миллионы раз превышать плотность токов эмиссии любого вида. Вследствие туннельного характера эмиссии разброс эмитированных электронов по энергии оказывается в несколько раз уже, чем в случае термоэлектронной эмиссии. Автоэлектронная эмиссия должна возбуждаться при низких температурах вплоть до абсолютного нуля. Процесс автоэлектронной эмиссии практически безынерционен [1].

Вследствие указанных особенностей прибор на основе холодного катода обеспечивает меньшее энергопотребление, лучшее быстродействие и меньшее время подготовки к работе, более широкий температурный диапазон и общую миниатюризацию. Однако в контексте рентгеновских источников, пожалуй, главным преимуществом наноразмерного автоэлектронного эмиттера является узкий электронный пучок, позволяющий при достаточной интенсивности получать малые фокусные пятна на мишени. В зависимости от конкретного применения в качестве источника электронов может быть использован как одиночный автоэмиссионный катод, работающий совместно с электронно-оптической системой и обеспечивающий фокусное пятно субмикронных размеров, так и массив таких эмиттеров, позволяющий достичь высоких суммарных значений катодного тока [2].

Еще одним шагом к миниатюризации рентгеновского источника является использование прострельной мишени, совмещенной с выходным рентгеновским окном. Такая мишень конструктивно состоит из тонкопленочного металлического анода, в котором под воздействием электронного пучка формируется рентгеновское излучение. Пленка нанесена на внутреннюю поверхность окна из прозрачного для рентгена материала, обеспечивающего вывод излучения из прибора. В настоящее время основным материалом для изготовления рентгеновских окон являются бериллиевые пластины толщиной около 150 мкм. Однако высокая стоимость и низкая технологичность процесса изготовления бериллиевых рентгеновских окон побуждает к поиску альтернативных вариантов. Такой альтернативой может стать прострельная мишень, сформированная на кремниевой мембране с использованием технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС).

В настоящей работе представлена концепция рентгеновского источника, состоящего из массива автоэмиссионных катодных узлов, который отделен вакуумным зазором от тонкопленочной металлической прострельной мишени, сформированной на кремниевой мембране и выполняю-

щей функцию рентгеновского окна. Разработаны математические модели наноразмерного катода, тонкопленочной прострельной мишени и кремниевое рентгеновское окно. Проведено моделирование с использованием программного пакета междисциплинарного анализа COMSOL Multiphysics [3], и получены результаты, важные для дальнейшего развития этой перспективной разработки.

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ РЕНТГЕНОВСКОГО ИСТОЧНИКА

В предлагаемой концепции рентгеновского источника роль катода выполняет массив автоэлектронных эмиттеров острейного типа с радиусом закругления при вершине порядка нескольких нанометров. Общий для всего массива управляющий электрод изготовлен в виде тонкой металлической пленки с самосовмещенными отверстиями напротив каждого эмиттера. Управляющий электрод изолирован от катодов диэлектрическим слоем. Подобный массив автоэмиссионных узлов технологически реализуем на основе кремния с использованием технологии МЭМС [4]. Рентгеновское окно представляет собой квадратную кремниевую мембрану, сформированную на пластине методом анизотропного травления, длина стороны 2 мм. В качестве прострельной мишени использована пленка металла, нанесенная на внутреннюю поверхность мембраны. Схематически предлагаемая модель изображена на рис. 1.

В рамках предложенной концепции с помощью математического моделирования должны быть решены следующие основные задачи: определение эмиссионных характеристик одиночного катодного узла заданной конфигурации и количества катодных узлов в массиве, необходимого для обеспечения заданного суммарного тока эмиссии; расчет траектории эмитированных электронов и размеров фокусного пятна на мишени; определение толщины прострельной мишени в зависимости от выбранного материала, интенсивностей генерируемого характеристического излучения, оптимальных параметров кремниевое рентгеновское окно, при которых в комбинации с выбранной мишенью достигается минимальное поглощение рентгеновского излучения при достаточной механической прочности.

РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НАНОКАТОДА

Одним из основных элементов сканирующего рентгеновского источника является нанокатод, изготовленный в форме иглы с радиусом закруг-

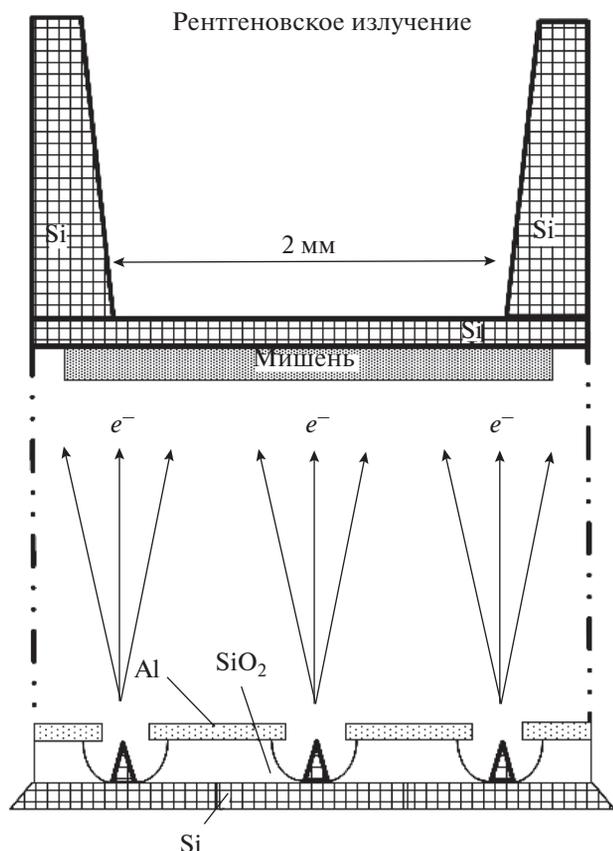


Рис. 1. Исследуемая концептуальная модель рентгеновского источника.

ления острия 10 нм. Важнейшим требованием к нанокатоду является достаточная величина тока эмиссии, генерируемого под действием внешнего электрического поля. Кроме того, линейные размеры и конфигурация нанокатода должны обеспечивать возможность формирования массива таких структур с целью увеличения суммарного тока эмиссии в устройстве (в качестве целевого значения принята величина 75 мкА). Также важными характеристиками нанокатода являются характер траекторий эмитированных электронов и диаметр результирующего электронного пучка. Эти параметры устройства сильно зависят от конфигурации электрического поля именно в области острия нанокатода [5].

Предложенная форма нанокатода приведена на рис. 2. Основными элементами являются подложка со сформированным на ней острием, слой изолирующего диэлектрика и металлическая пленка вытягивающего электрода. В соответствии с перечисленными выше требованиями установлены геометрические размеры катода, которые представлены в табл. 1.

Напряжения, приложенные к системе, варьируются следующим образом: разность потенциа-

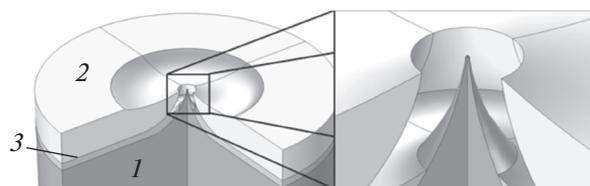


Рис. 2. Геометрия нанокатода: 1 – кремний (подложка); 2 – металлический вытягивающий электрод; 3 – диэлектрический изолирующий слой.

лов на вытягивающем электроде изменяется в пределах 100–150 В, на прострельной мишени – в пределах 0–40 кВ. Моделирование распределения электрического поля в системе проводилось с использованием программного пакета междисциплинарного анализа COMSOL Multiphysics [3].

Полученное в результате моделирования распределение напряженности электрического поля по поверхности острия нанокатода использовали для расчета тока эмиссии в соответствии с уравнением Фаулера–Нордгейма [6]:

$$j = \frac{eF^2}{4\pi^2\hbar U_0} \sqrt{\frac{\mu}{U_0 - \mu}} \exp\left[-\left(\frac{4\sqrt{2m}}{3F\hbar}\right)(U_0 - \mu)^{\frac{3}{2}}\right],$$

где F – электростатическая сила, определяемая как произведение заряда электрона e и напряженности электрического поля E , μ – уровень Ферми (в данном случае для высоколегированного кремния взято значение 2.12 эВ), U_0 – высота потенциального барьера (6.27 эВ), m – масса электрона. Карты распределения напряженности поля и величины плотности эмиссионного тока приведены на рис. 3а, 3б. На рис. 3в приведена зависимость тока эмиссии от напряжения на вытягивающем электроде и на мишени.

Можно видеть, что заметный ток возникает при напряжении на вытягивающем электроде 100 В, а при 150 В достигает значений порядка 90 нА. Следовательно, для обеспечения суммарного тока эмиссии 75 мкА необходим массив из ~850 нанокатодов. Поскольку линейные размеры

Таблица 1. Основные размеры элементов нанокатода

| Параметр | Значение |
|---|----------|
| Радиус закругления острия | 10 нм |
| Радиус отверстия в вытягивающем электроде | 4.5 мкм |
| Высота иглы | 1 мкм |
| Толщина диэлектрика | 0.2 мкм |
| Толщина пленки электрода | 0.9 мкм |
| Расстояние до мишени | 5 мм |

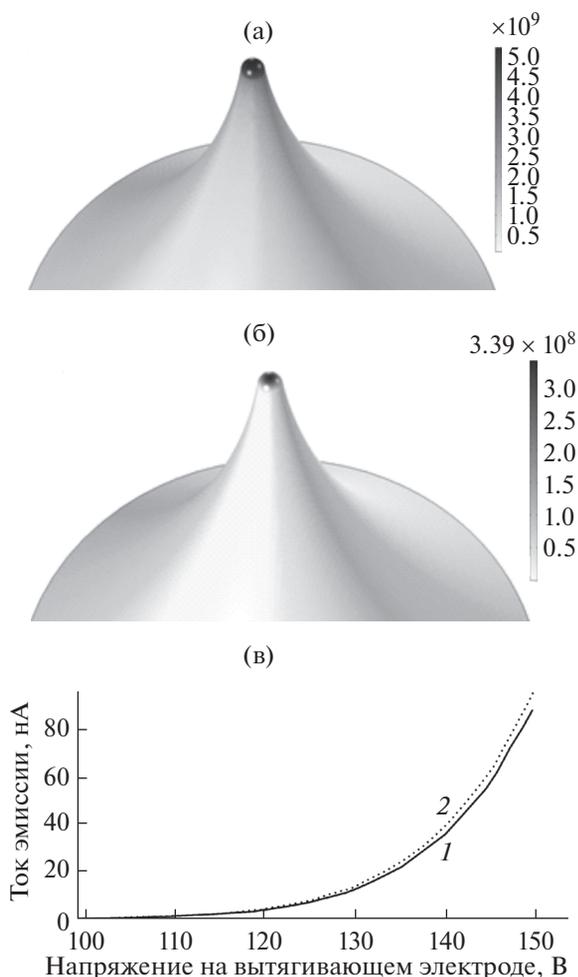


Рис. 3. Распределение напряженности электрического поля (а) и плотности эмиссионного тока (б) по поверхности острия нанокатода. Зависимость тока эмиссии от напряжения на электродах (в) при напряжении на мишени: 1 – 0; 2 – 30 кВ.

нанокатодов не превышают 10 мкм, размещение такого количества на небольшой площади является технически выполнимой задачей.

Траектории электронов эмиссии рассчитываются из распределения электрического поля по формуле:

$$d(m_p v)/dt = F = eZE,$$

где m_p – масса частицы, v – скорость частицы, F – электростатическая сила, e – заряд электрона, Z – зарядовое число частицы, E – напряженность электрического поля. Расчет также проводили с использованием пакета COMSOL Multiphysics. Плотность начального распределения частиц по поверхности катода задается пропорционально плотности тока эмиссии, рассчитанной выше. Результирующие траектории приведены на рис. 4. Радиус пятна электронов, попавших

на анодную мишень из массива эмиттеров, составил приблизительно 300 мкм.

Таким образом, моделирование важнейших параметров нанокатода дало результаты, удовлетворяющие концептуальным требованиям, предъявляемым к этому элементу автоэмиссионного узла.

РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОСТРЕЛЬНОЙ МИШЕНИ

Прострельная мишень рентгеновского узла состоит из металлической пленки, служащей генератором излучения, и прозрачной для рентгена кремниевой мембраны, на которой закреплена мишень. Кремниевая мембрана должна выдерживать разность давлений минимум 1 атм. [7]. Соответственно, необходимо определить толщины металлических пленок, необходимые для генерации излучения с обратной стороны мишени и толщину кремниевой мембраны, обеспечивающую ее прозрачность для рентгена и высокую механическую прочность.

В качестве материала мишени были выбраны W ($Z = 74$) и Mo ($Z = 42$). Методом Монте-Карло с использованием программы Win X-Ray [8] были рассчитаны траектории электронов, проникающих в материал мишени, при энергии пучка 40 кэВ. При этой энергии W генерирует излучение с переходами $L_{\alpha}, L_{\beta 1}, L_{\beta 2}, L_{\gamma}, M_{\alpha}$, а Mo – излучение $K_{\alpha 1}, K_{\alpha 2}, K_{\beta 1}, K_{\beta 2}, L_{\alpha}, L_{\beta 1}, L_{\beta 2}, L_{\gamma}$. Также с помощью программы Win X-Ray были вычислены значения характеристической интенсивности $\phi(\rho z)$ для различных толщин пленок мишени. Эти расчеты показывают, что максимум интенсивности рентгеновского излучения, выходящего из пленки, достигается для толщин, представленных в табл. 2. Распределение интенсивностей для различных толщин пленок изображено на рис. 5. Можно видеть, что для эффективной генерации рентгеновского излучения необходимы либо пленка вольфрама толщиной 0.13 мкм, либо пленка молибдена толщиной 0.25 мкм.

Для прозрачной кремниевой мембраны крайне важно небольшое падение интенсивности рентгеновского излучения при прохождении через нее. Для расчета этой величины используется закон Бугера–Ламберта–Бера [9]:

$$I = I_0 \exp(-\mu d),$$

где I – интенсивность излучения после прохождения через вещество, I_0 – начальная интенсивность, d – толщина поглотителя, μ – коэффициент затухания.

В табл. 3 представлены толщины кремниевой мембраны, для которых падение интенсивности излучения будет эквивалентно падению интенсивности в прозрачной для рентгена мембране

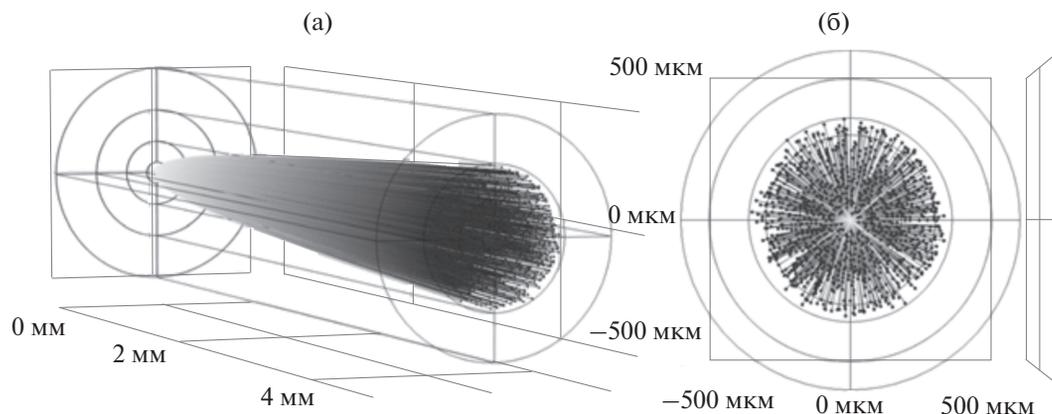


Рис. 4. Траектории электронов эмиссии в электронно-лучевой трубке с полевым нанокатодом: а – вид сбоку; б – вид спереди.

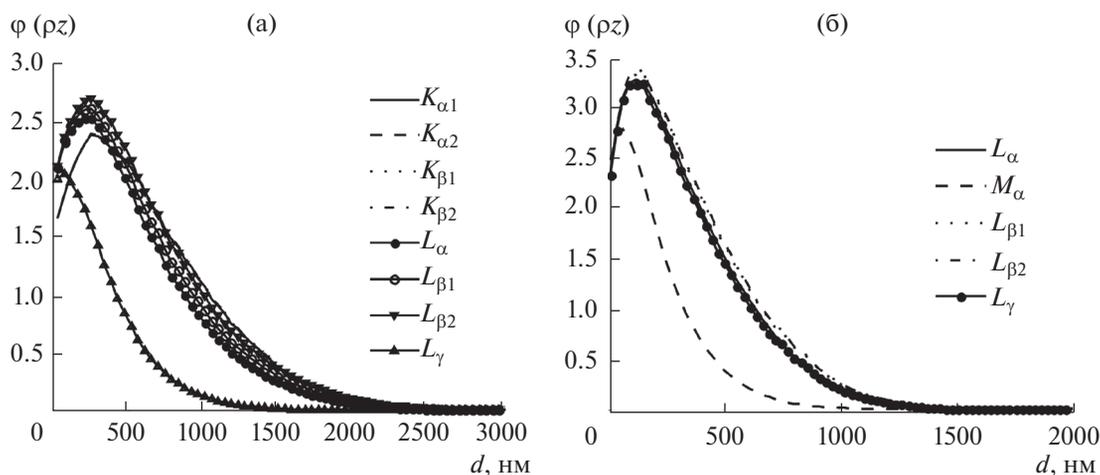


Рис. 5. Зависимость характеристической интенсивности от толщины пленки мишени, изготовленной из молибдена (а) и вольфрама (б).

толщиной 150 мкм из бериллия, наиболее распространенного в настоящее время материала для изготовления рентгеновских окон. В табл. 4 также представлен результат расчета интенсивности рентгеновского излучения в кремниевой мембране толщиной 1 мкм. Исходя из представленных в табл. 3 и 4 данных можно сделать вывод, что тре-

буемая прозрачность кремния может быть достигнута при толщине мембраны в среднем порядка 1–2 мкм. Экспериментальные измерения показали, что кремниевая мембрана толщиной порядка 1 мкм и размером 1 × 1 мм выдерживает избыточные давления более 2 атм. Таким образом, кремниевая мембрана толщиной 1 мкм обес-

Таблица 2. Толщина анодной пленки для генерации рентгеновского излучения с максимальной интенсивностью

| Материал анода | Вольфрам | | | | | | | |
|------------------|---------------|----------------|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | Тип излучения | L_{α} | | M_{α} | $L_{\beta 1}$ | $L_{\beta 2}$ | L_{γ} | |
| Толщина d , нм | 130 | | 40 | 122 | 147 | 132 | | |
| Материал анода | Молибден | | | | | | | |
| | Тип излучения | $K_{\alpha 1}$ | $K_{\alpha 2}$ | $K_{\beta 1}$ | $K_{\beta 2}$ | L_{α} | $L_{\beta 1}$ | $L_{\beta 2}$ |
| Толщина d , нм | 245 | | 248 | 243 | 246 | 239 | 245 | 101 |

Таблица 3. Расчет толщин кремниевой мембраны, для которых падение интенсивности излучения будет эквивалентно падению интенсивности в прозрачной для рентгена мембране толщиной 150 мкм из бериллия

| Материал мембраны | | Be | | Падение интенсивности рентгеновского излучения I/I_0 | Si | |
|--------------------------------------|---------------|---|--------------|--|---|--------------|
| Плотность ρ , г/см ³ | | 1.848 | | | 2.33 | |
| Тип излучения | λ , Å | Коэффициент затухания μ , м ⁻¹ | Толщина, мкм | | Коэффициент затухания μ , м ⁻¹ | Толщина, мкм |
| MoL α | 5.414 | 9062.897 | 150 | 0.257 | 461906.566 | 2.943 |
| MoL β_1 | 5.177 | 7887.5502 | | 0.306 | 412129.804 | 2.871 |
| MoL β_2 | 4.923 | 6747.912 | | 0.363 | 362013.228 | 2.796 |
| MoL γ | 4.726 | 5945.339 | | 0.410 | 325494.340 | 2.740 |
| MoK α_1 | 0.709 | 39.522 | | 0.994 | 1433.640 | 4.135 |
| MoK α_2 | 0.714 | 39.795 | | 0.994 | 1463.820 | 4.077 |
| MoK β_1 | 0.632 | 35.938 | | 0.995 | 1020.093 | 5.503 |
| MoK β_2 | 0.633 | 35.977 | | 0.995 | 1024.872 | 5.529 |
| WL α | 1.487 | 168.675 | | 0.975 | 12732.300 | 1.987 |
| WL β_1 | 1.245 | 105.304 | | 0.984 | 7570.596 | 2.086 |
| WL β_2 | 1.099 | 78.593 | | 0.988 | 5245.021 | 2.248 |
| WL γ | 6.992 | 19888.861 | | 0.056 | 77383.800 | 37.179 |
| WM α | 1.282 | 113.323 | | 0.983 | 8249.940 | 2.060 |

печивает не только достаточную прозрачность для рентгеновского излучения, генерируемого мишенями практически всех типов, но и необхо-

димую механическую прочность. Из [9] следует, что значение коэффициента прозрачности более 0.5 для кремниевой мембраны толщиной 1 мкм сохраняется в диапазоне длин волн рентгеновского излучения до 1.6 нм.

Таблица 4. Расчет падения интенсивности рентгеновского излучения в кремниевой мембране толщиной 1 мкм

| Тип излучения | λ , Å | Падение интенсивности рентгеновского излучения I/I_0 |
|----------------|---------------|--|
| MoL α | 5.414 | 0.630 |
| MoL β_1 | 5.177 | 0.662 |
| MoL β_2 | 4.923 | 0.696 |
| MoL γ | 4.726 | 0.722 |
| MoK α_1 | 0.709 | 0.998 |
| MoK α_2 | 0.714 | 0.998 |
| MoK β_1 | 0.632 | 0.999 |
| MoK β_2 | 0.633 | 0.999 |
| WL α | 1.487 | 0.987 |
| WL β_1 | 1.245 | 0.992 |
| WL β_2 | 1.099 | 0.995 |
| WL γ | 6.992 | 0.925 |
| WM α | 1.282 | 0.992 |

ВЫВОДЫ

В рамках предложенной концептуальной модели рентгеновского источника были разработаны математические модели нанокатода, тонкопленочной прострельной мишени и кремниевое рентгеновского окна. Было проведено моделирование, и получены результаты, показывающие принципиальную работоспособность предложенной концепции. Установлено, что уровень тока эмиссии 75 мкА достигается при использовании массива из 850 нанокатодов. При этом напряжение на управляющем электроде не превышает 150 В, а диаметр фокусного пятна на мишени, расположенной на расстоянии 5 мм, не более 500 мкм. Смоделирована работа прострельной мишени, совмещенной с кремниевым рентгеновским окном. Показано, что кремниевая мембрана толщиной 1 мкм является прозрачной для рентгеновского излучения в диапазоне длин волн до 1.6 нм и обеспечивает достаточную механическую прочность при перепаде давлений порядка 2 атм.

В заключение отметим, что представленная концептуальная модель является существенно упрощенной и не учитывает ряд важных физиче-

ских процессов, прежде всего разогрев мишени и отвод тепла мембраной. В то же время именно использование автоэмиссионных катодов открывает возможность работы рентгеновского источника в импульсном режиме, что в комбинации с малым размером фокусного пятна нивелирует процесс разогрева мишени, делая его не столь критичным. Тем не менее, при дальнейшем развитии модели будет уделено внимание расчету тепловых процессов, как в области автокатодов, так и в области рентгеновского окна [10]. Еще одним направлением усовершенствования концепции станет внедрение электронной оптики для фокусировки и управления электронным пучком. Комбинация автоэмиссионного катода как источника узкого электронного пучка, электронной оптики и прострельной мишени, совмещенной с кремниевым рентгеновским окном, открывает возможность создания нового класса приборов — сканирующих, а также мультиспектральных микрофокусных рентгеновских источников.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена на оборудовании ЦКП МСТ и ЭКБ МИЭТ при поддержке Минобрнауки РФ в рамках ФЦП “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–

2020 годы” (ГК № 14.578.21.0001, уникальный идентификатор соглашения RFMEFI57814X0001).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фурсей Г.Н. // Соросовский образовательный журн. 2000. Т. 6. № 11. С. 96.
2. Shwoebel P.R., Spindt C.A., Holland C.E. // J. Vac. Sci. Technol. B. 2005. V. 23. P. 691.
3. URL: <http://www.comsol.com/>.
4. Дюжев Н.А., Махиборода М.А., Гусев Е.Э., Грязнева Т.А., Демин Г.Д. // Сборник трудов. Проблема разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем. Часть IV, под ред. академика РАН А.Л. Стемповского. М.: ИППМ РАН, 2016. С. 37.
5. Lepetit B., Lemoine D., Márquez-Mijares M. // J. Appl. Phys. 2016. V. 120. P. 085105.
6. Fowler R.H., Nordheim L. // Proceed. Royal Soc. London. A. 1928. V. 119. №. 781. P. 173.
7. Дюжев Н.А., Дедкова А.А., Гусев Е.Э., Новак А.В. // Известия Вузов. Электроника. 2016. Т. 21. № 4. С. 367.
8. Demers H., Horny P., Gauvin R., Lifshin E. // Microscopy and Microanalysis. 2002. V. 8(S02). P. 1498.
9. Van Bokhoven J.A., Lamberti C. // X-Ray Absorption and X-Ray Emission Spectroscopy: Theory and Applications. John Wiley & Sons, 2016. P. 109.
10. Djuzhev N.A., Makhboroda M.A., Kretov V.I., Churilin M.N., Rudnev V.Yu. // Russian Microelectronics. 2012. V. 41. № 7. P. 387.

Concept Research and Development of Field Emission X-Ray Source

N. A. Djuzhev, M. A. Makhboroda, R. Y. Preobrazhensky, G. D. Demin, E. E. Gusev, A. A. Dedkova

A concept of an X-ray source based on field emission cathode and shot target combined with an X-ray window is proposed. It is shown by numeric simulation that the device is capable to generate a sufficient emission current, provide a small electron beam focus spot and high resolution. Additionally, optimal target characteristics are obtained to ensure maximal X-ray emission intensity. It was obtained that an efficient X-ray generation is achieved in the tungsten film with the thickness of 0.25 μm and in the molybdenum film with the thickness of 0.13 μm respectively. The transparency of silicon membrane with the thickness of 1–2 μm to X-ray radiation with the range of wavelengths up to 1.6 nm as well as the sufficient mechanical strength of membrane to the pressure difference of about 2 atm. were demonstrated, which indicates the possibility of its use as an X-ray transparent window.

Keywords: X-ray source, field emission nanocathode, field electron emission, emission current, microelectromechanical systems, X-ray, computer simulation.